Messung und Errechnung der Druckverluste insbesondere in Siemens-Martin-Oefen

Auszug

aus der von der

Technischen Hochschule zu Breslau

zur

Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs

genehmigten

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Werner Heil aus Dahlbruch

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Juni 1928

Referent:
Professor Dr.-Ing. E. h. W. Tafel

Korreferent:
Professor Dr.-Ing. L. Mann

Düsseldorf
Verlag Stahleisen m. b. H.
1928

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Messung und Errechnung der Druckverluste insbesondere in Siemens-Martin-Oefen[1].

(Die auftretenden Widerstände. Druckverluste in technischen Rohrleitungen und kritische Betrachtung der Untersuchungsergebnisse. Die Druckverluste in verschiedenen Abschnitten des Siemens-Martin-Ofens und Kritik der Untersuchungsergebnisse. Graphische Darstellung des Druckverlaufs. Vergleich der Meß- und Rechnungsergebnisse. Folgerungen.)

Die auftretenden Widerstände.

Ueber die Reibungswiderstände und die Einzelwiderstände, welche bei der Bewegung von Gasen durch ein Kanalsystem auftreten, finden sich im Schrifttum zahlreiche Angaben.

a) Für die Errechnung der Reibungswiderstände wurde in der vorliegenden Arbeit die von Rietschel-Brabbée aufgestellte Gleichung benutzt[2]):

$$h_R = \alpha \cdot \gamma^{0,852} \frac{w^{1,924}}{d^{1,281}} \cdot \ell \text{ mm WS} \qquad (1)$$

Hierin ist

- α ein Koeffizient (für Metalleitungen $\alpha = 5{,}66$),
- γ das spezifische Gewicht des Gases in kg/m³,
- w die Geschwindigkeit in m/sek,
- d der Durchmesser der Gasleitung in mm,
- ℓ die Länge der Gasleitung in m.

Für die Mauerkanäle wurde der α-Wert nach Angaben von Bansen[3]) eingesetzt. Bansen hat durch Versuche festgestellt

für Gasgeschwindigkeit $w < 5$ m/sek $\alpha = 2 \cdot 5{,}66$,
„ „ $w > 5$ m/sek $\alpha = 1{,}5 \cdot 5{,}66$.

Bei rechteckigen Kanälen ist der Querschnitt durch einen gleichwertigen Durchmesser zu ersetzen, der sich ergibt zu

$$d = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b} \text{ mm}^3)$$

b) Die Einzelwiderstände werden allgemein ausgedrückt durch die Gleichung

$$h_E = \zeta \cdot \frac{w^2}{2g} \cdot \gamma \qquad (2)$$

Für die Koeffizienten ζ hat Bansen eine wertvolle graphische Zusammenstellung gegeben[3]), die in *Abb. 1*, durch andere Schrifttumsangaben ergänzt, wiedergegeben ist.

Außer durch Reibungs- und Einzelwiderstände wird der statische Druckverlauf in Rohrleitungen und Siemens-Martin-Oefen noch beeinflußt durch Aenderung der Gasgeschwindigkeit als Folge von Querschnittsänderung oder Erwärmung bzw. Abkühlung des Gasstroms[4]) und durch Auftrieb.

Demnach kann geschrieben werden:

$$\Sigma h = \Sigma h_R + \Sigma h_E + \Sigma h_F + \Sigma h_T + \Sigma h_A \text{ mm WS} \qquad (3)$$

Hierin bedeutet:

- Σh statischer Druckabfall[5]),
- Σh_R Summe der Reibungswiderstände,
- Σh_E Summe der Einzelwiderstände,
- Σh_F Summe der Aenderung an kinetischer Energie durch Querschnittsänderungen,
- Σh_T Summe der Aenderung an kinetischer Energie durch Temperaturänderungen,
- Σh_A Summe des Auftriebes.

Gleichung 3 kann ersetzt werden durch:

$$\begin{aligned} \Sigma h = {} & \Sigma\, \alpha \cdot \gamma^{0,852} \cdot \frac{w^{1,924}}{d^{1,281}} \cdot \ell \\ & + \Sigma\, \zeta \cdot \frac{w^2}{2g} \cdot \gamma \\ & + \Sigma\, \frac{w^2}{2g} \cdot \gamma \left(\frac{F^2}{F_1^2} - 1 \right)^{6)} \\ & + \Sigma\, \frac{w^2}{2g} \cdot \gamma \left(\frac{t_1 + 273}{t + 273} - 1 \right)^{7)} \\ & + \Sigma\, H\, (\gamma_L - \gamma_G) \text{ mm WS.} \end{aligned} \qquad (4)$$

Es bedeutet in Gleichung 4:

- F Querschnitt des Strömungsweges in m²,
- H Höhenunterschied in m,
- γ_L spezifisches Gewicht der Außenluft in kg/m³,
- γ_G spezifisches Gewicht des strömenden Mittels in kg/m³.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Druckverhältnisse in mehreren Rohrleitungen und Siemens-Martin-Oefen mit Hilfe von Gleichung 4 errechnet und mit genau gemessenen Werten verglichen.

---

[1]) Die vorliegende Arbeit wurde während einer 1½jährigen Tätigkeit bei der Wärmestelle Düsseldorf angefertigt.

[2]) Rietschel-Brabbée: Heiz- u. Lüftungstechnik, 6. Aufl., Bd. 2 (Berlin: Julius Springer 1922) S. 94/5.

[3]) Ber. Stahlwerksaussch. V. d. Eisenh. Nr. 111 (1926) S. 10/1.

[4]) Strömt das Gas durch einen Kanal, der nach seinem Ende hin steigende Temperaturen aufweist, so wirkt die Temperaturerhöhung wie eine Querschnittsverengerung, und die eintretende Volumenvergrößerung zwingt das strömende Mittel zu schnellerem Durchzug und bedingt als Reaktion eine Erhöhung des statischen Druckes am Anfang des Kanals bzw. einen Druckabfall, welcher der Beschleunigung gleichkommt. Bei einem Sinken der Temperatur ergeben sich die umgekehrten Verhältnisse.

[5]) Unter statischem Druckabfall ist folgende Größe verstanden: Ist im Innern des Strömungsweges an irgendeiner Stelle der statische Druck $= p_1$ und ist in der gleichen Höhenlage der Druck der Außenluft $= p_1'$, so ist die gemessene statische Druckdifferenz $= p_1 - p_1'$; an einer anderen Stelle des Strömungsweges möge die statische Druckdifferenz $= p_2 - p_2'$ sein. Dann ist der statische Druckabfall $= (p_1 - p_1') - (p_2 - p_2')$.

[6]) $h_F = \frac{w_1^2}{2g}\gamma - \frac{w^2}{2g}\gamma$.

Es gilt $w_1 \cdot F_1 = w \cdot F$

und $w_1 = w \frac{F}{F_1}$

folglich $h_F = \frac{w^2}{2g} \left(\frac{F^2}{F_1^2} - 1 \right)$ mm WS.

[7]) $h_T = \frac{w_1^2}{2g}\gamma_1 - \frac{w^2}{2g}\gamma$

$w_1 = w \frac{t_1 + 273}{t + 273}$ $\quad \gamma_1 = \gamma \frac{t + 273}{t_1 + 273}$

$h_T = \frac{w^2}{2g}\gamma \left(\frac{t_1 + 273}{t + 273} - 1 \right)$ mm WS.

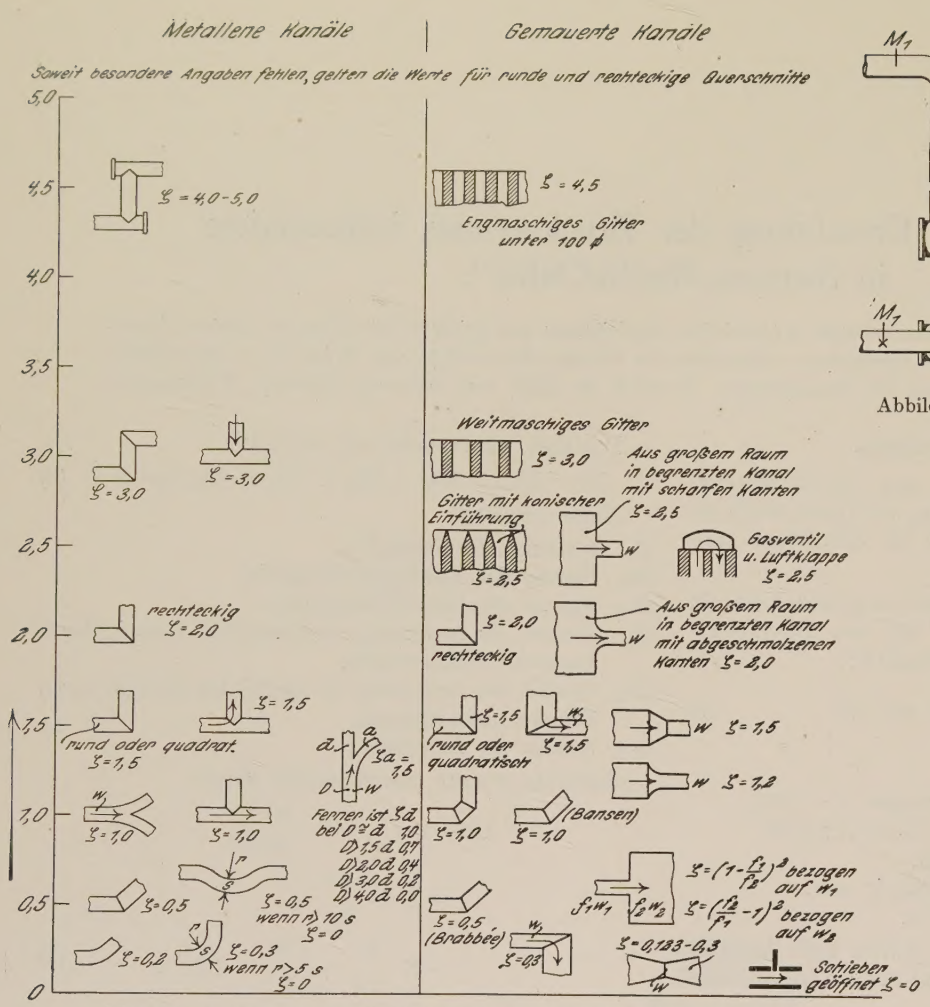

Abbildung 1. ζ-Werte von Einzelwiderständen für Luft und Gase in metallenen und gemauerten Kanälen*).
[Nach Rietschel-Brabbée: Heiz- und Lüftungstechnik, Bd. 2, Hilfstafel 9. Ber. Stahlw.-Aussch. V. d. Eisenh. Nr. 111 (1926) S. 6; Mitt. Wärmestelle V. d. Eisenh. Nr. 95 (1926) S. 692/3.]

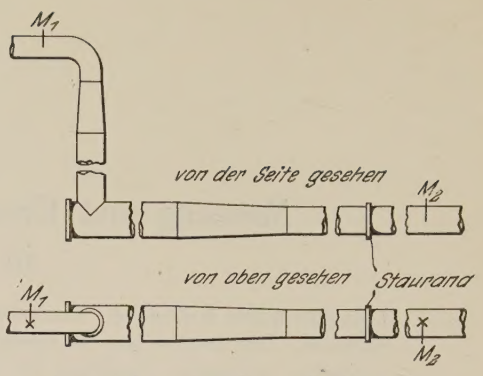

Abbildung 1 b. Verlauf der Heißgasleitung.

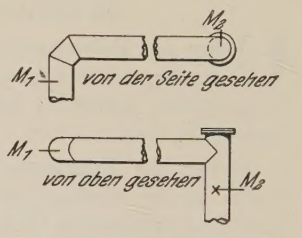

Abbildung 1 c. Verlauf der Schwelgasleitung.

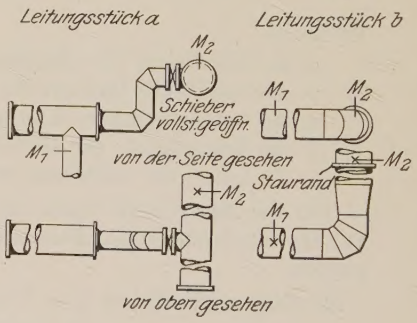

Abbildung 1 d. Verlauf der Mischgasleitung.

Die Druckverluste in technischen Rohrleitungen.

Die an Rohrleitungen gemachten Untersuchungen wurden an einer Gaserzeugeranlage vorgenommen. Zur einfachen Kennzeichnung wurden die untersuchten Leitungen, deren Verlauf aus *Abb. 1a bis 1d* hervorgeht, im folgenden als

Windleitung,
Heißgasleitung,
Schwelgasleitung und
Mischgasleitung

bezeichnet.

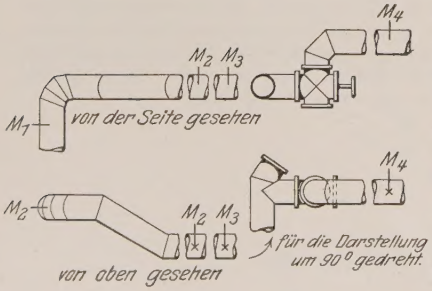

Abbildung 1 a. Verlauf der Windleitung.

Festgestellt wurden Menge, Temperatur und Analyse bzw. spezifisches Gewicht des strömenden Mittels als Unterlagen für die Druckverlustrechnung. Ferner wurden die Druckverluste durch Messung der statischen Drücke bestimmt.

*) Bei Querschnittsänderungen ist in den ζ-Werten — ausgenommen der Einzelwiderstandskoeffizient für plötzliche Querschnittserweiterung — der Einfluß der veränderten Geschwindigkeitshöhe auf den Druckverlust mit enthalten.

Kritische Betrachtung der Ergebnisse der Rohrleitungs-Untersuchungen.

Nachstehend sind die für die einzelnen untersuchten Leitungsstücke gemessenen und errechneten Druckverluste zusammengestellt.

	Druckverlust mm WS		Errechneter Druckverlust in % des gemessenen
	errechnet	gemessen	
Windleitung:			
Leitungsstück a . . .	1,813	1,3	139,3
Leitungsstück b . . .	1,642	1,2	136,8
Leitungsstück c . . .	9,856	9,3	105,8
Heißgasleitung . . .	9,546	8,6	110,8
Schwelgasleitung . .	1,938	6,9	28,1
Mischgasleitung:			
Leitungsstück a . . .	35,810	35,1	102,0
Leitungsstück b . . .	48,048	45,0	106,6

Es fällt zunächst die mangelnde Uebereinstimmung der Ergebnisse aus den Versuchen auf. Durch einige Ueberlegungen ist diese Verschiedenheit aber zu begründen, so daß sie sehr wohl eindeutige Folgerungen zuläßt.

Für das Leitungsstück c der Windleitung, für die Heißgasleitung und für die Leitungsstücke a und b der Mischgasleitung liegen die errechneten Druckverluste ~ 2 bis 10 % über den gemessenen. Da die Genauigkeit der Rech-

nung kaum weiter geht als ± 10 %, kann man also annehmen, daß Rechnung und Messung übereinstimmen.

Etwas größere Abweichungen zeigen sich bei den Leitungsstücken a und b der Windleitung. Sie lassen sich mit der Kleinheit der betreffenden Druckverluste begründen. Zu der Rechnungsungenauigkeit tritt eine Abweichung durch Ablesefehler, die bei 0,2 mm WS schon 15 % ausmacht.

Niedriger als der gemessene ist der errechnete Druckverlust für die Schwelgasleitung, und zwar um ~ 70 %. Hier ist die Ursache der Abweichung in dem betrieblichen Zustande der Leitung zu suchen. Die Einflüsse der Einzel- und Reibungswiderstände werden durch den Teergehalt des Gases und die Ablagerungen im Innern der Leitung stark überdeckt, so daß man diese Messungen nicht als Vergleichsmaß für die Rechnung heranziehen darf.

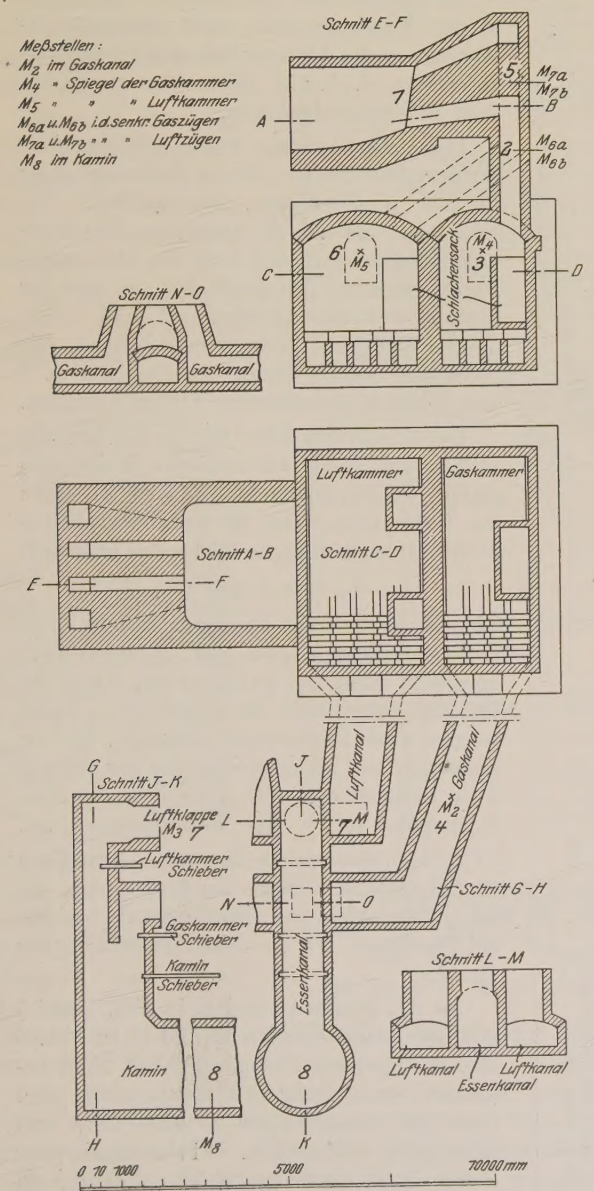

Abbildung 2. Schematische Darstellung der Bauart der untersuchten Siemens-Martin-Oefen 1 und 2.

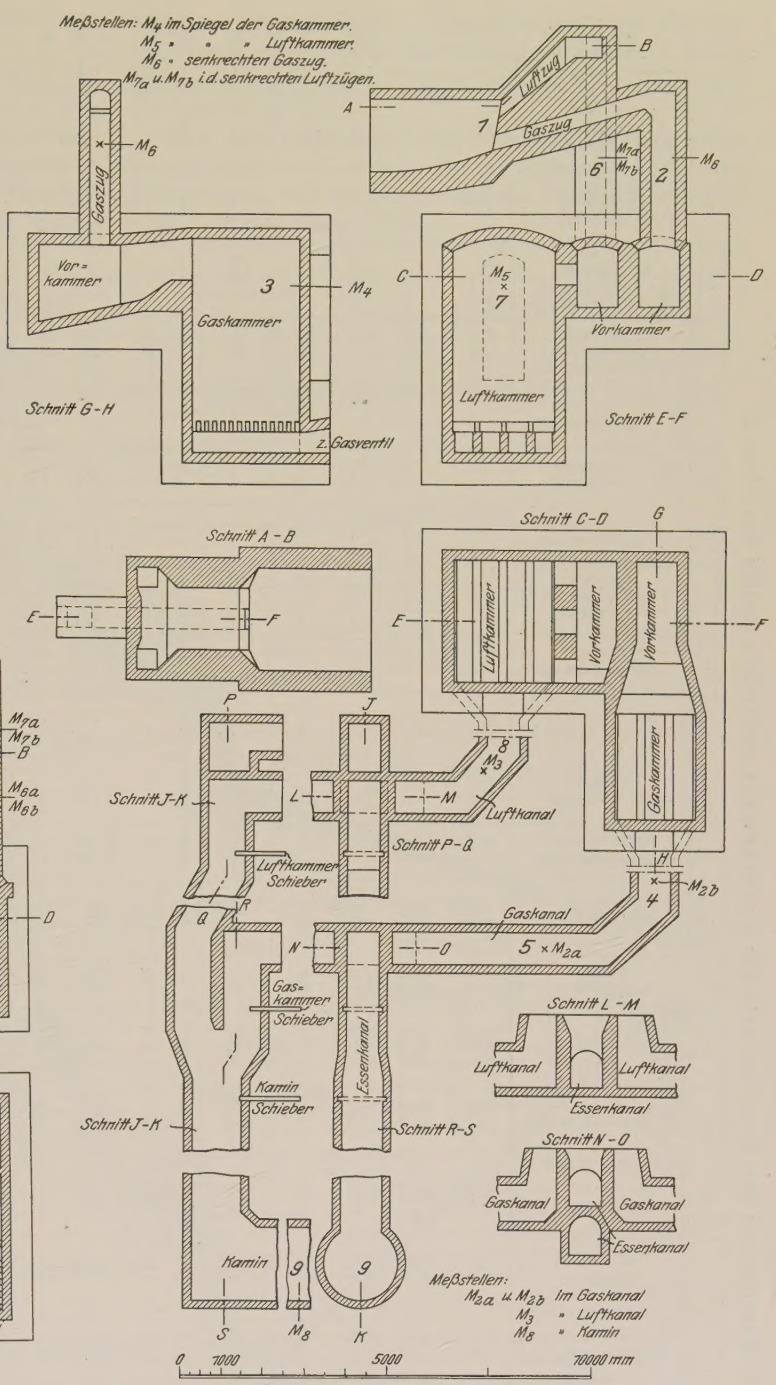

Abbildung 3. Schematische Darstellung der Bauart des untersuchten Siemens-Martin-Ofens 3.

Zusammenfassung.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Untersuchung der Druckverluste in technischen Rohrleitungen der vorliegenden Abmessungen durch Messung und Rechnung mit hinreichender Genauigkeit die Gültigkeit der angewandten Rechnungsgrößen für Leitungen im Betriebszustand ergeben hat, sofern diese sich in einigermaßen sauberem Zustande befanden.

Die Druckverluste in Siemens-Martin-Oefen.

Zur Ermittlung der Druckverluste in Siemens-Martin-Oefen wurden an drei Oefen entsprechende Untersuchungen vorgenommen. Ofen 1 und 2 waren von gleicher Bauart *(Abb. 2)*. Ofen 3 ist in *Abb. 3* wiedergegeben. Wie bei den Untersuchungen an den Rohrleitungen, so wurden auch hier Menge, Temperatur und Analyse bzw. spezifisches Gewicht

Zahlentafel 1. Berechnung der Druckverluste des Frischgases in der linken Hälfte des Ofens 2.

	Faktoren für die Druckbilanz	a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x
		Strömungsquerschnitt m^2	Gasmenge mm^3/st	Geschwindigkeit m/sek w_0	Spez. Gewicht kg/m^3 γ_0	Druck mm QS p	Temperatur °C t	$w = w_0 (1 + \alpha t) \frac{p_0}{p}$	$\gamma = \frac{\gamma_0}{1 + \alpha t} \frac{p}{p_0}$	Einzelwiderstand ζ	$\zeta \cdot \frac{w^2}{2g} \cdot \gamma$	Beiwert für Reibungsverlust α	Länge des Gasweges m	$\alpha \cdot \gamma^{0,852} \frac{w^{1,924}}{d^{1,281}} \cdot l$	Es wird wiedergewonnen	Druckverlust bzw. Druckgewinn mm WS	Höhenunterschied m	$\gamma_{Luft} = 1{,}21$ Auftrieb mm WS	$\gamma_{Luft} = 1{,}21$ Gegenauftrieb mm WS	Druckverlust gegen die Atmosphäre mm WS	(Gemessener Druckverlauf gegen die Atmosphäre mm WS	Druckgewinn durch Gasgewicht mm WS	Druckverlust durch Gasgewicht mm WS	Absoluter Druckverlauf mm WS
1	Reibung im Wechselkanal . . .	0,50	3300	1,79	1,19	763	520	5,10	0,413	—	—	—	—	0,07	—	— 0,07	—	—	—	+ 5,20	(+ 5,27)	—	—	+ 5,20
2	Erwärmung im Wechselkanal .	0,50	3300	1,79	1,19	763	550 (495)	5,37 (5,01)	0,398 (0,426)	1,0	0,58 (0,54)	—	—	—	—	— 0,04	—	—	—	+ 5,16	—	—	—	+ 5,16
3	Richtungswechsel in die Gaskammer	0,90	3300	0,99	1,19	763	550	2,98	0,398	0,3	0,05	—	—	—	—	— 0,05	—	—	—	+ 5,11	—	—	—	+ 5,11
4	Gitterwerk	7,50	3300	0,12	1,19	763	550	0,36	0,398	3,0	0,04	—	—	—	—	— 0,04	—	—	—	+ 5,07	—	—	—	+ 5,07
5	Reibung im Gitterwerk . . .	3,00	3300	0,30	1,19	763	790	0,90	0,308	—	—	11,3	2,00	0,03	—	— 0,03	2,50	2,25	—	+ 7,29	—	—	0,77	+ 4,27
6	Erwärmung im Gitterwerk . .	3,00	3300	0,30	1,19	763	1030	1,43	0,250	1,0	0,03 (0,02)	—	—	—	—	— 0,01	—	—	—	+ 7,28	+ 6,54	—	—	+ 4,26
7	Eintritt in die senkrechten Züge	0,37	3300	2,46	1,19	763	1030	11,50	0,250	2,5	4,21	—	—	—	—	— 4,21	0,50	0,49	—	+ 3,56	—	—	0,12	— 0,07
8	Reibung in den senkrechten Zügen	0,37	3300	2,46	1,19	763	1110	12,20	0,236	—	—	8,5	2,00	0,27	—	— 0,27	2,00	1,95	—	+ 5,24	—	—	0,47	— 0,81
9	Erwärmung in den senkrechten Zügen	0,37	3300	2,46	1,19	763	1190	13,12	0,223	1,0	1,96 (1,68)	—	—	—	—	— 0,28	—	—	—	+ 4,96	+ 6,68	—	—	— 1,09
10	Reibung in den senkrechten Zügen	0,37	3300	2,46	1,19	763	1220	13,40	0,219	—	—	8,5	1,00	0,15	—	— 0,15	1,00	0,99	—	+ 5,80	—	—	0,22	— 1,46
11	Erwärmung in den senkrechten Zügen	0,37	3300	2,46	1,19	763	1250	13,70	0,214	1,0	2,05 (1,96)	—	—	—	—	— 0,09	—	—	—	+ 5,71	—	—	—	+ 1,55
12	Richtungswechsel in die schrägen Züge	0,35	3300	2,60	1,19	763	1250	14,50	0,214	1,5	3,44	—	—	—	—	— 3,44	—	—	—	+ 2,27	—	—	—	— 4,99
13	Reibung in den schrägen Zügen,	0,32	3300	2,80	1,19	763	1280	15,89	0,210	—	—	8,5	2,00	0,43	—	— 0,43	—	—	—	+ 1,84	—	—	—	— 5,42
14	Erwärmung und Verengung in den schrägen Zügen	0,28	3300	3,28	1,19	763	1310	18,95	0,206	1,0	3,77 (2,29)	—	—	—	—	— 1,48	—	—	—	+ 0,36	—	—	—	— 6,90

des strömenden Mittels als Unterlagen für die Druckverlustrechnung bestimmt. Ermittelt wurden ferner durch Messung der statischen Drücke die auftretenden Druckverluste.

Für die rechnerische Ermittlung der Druckverluste in Siemens-Martin-Oefen ist eine natürliche Gliederung durch die Gasbewegung im Ofensystem gegeben.

Man kann bei jedem Ofen fünf Strömungsabschnitte bzw. Strömungswege unterscheiden, nämlich

1. den Frischgasweg von der Leitung bzw. dem Wechselkanal in den Herd,
2. den Luftweg von der Leitung bzw. dem Wechselkanal in den Herd,
3. den Abgasweg vom Herd durch die Gaskammer bis zum Essenkanal,
4. den Abgasweg vom Herd durch die Luftkammer bis zum Essenkanal,
5. den Abgasweg vom Essenkanal bis zur Kaminspitze.

Es ergeben sich also für jede Ofenhälfte in der Frischgasperiode zwei Strömungsabschnitte, in der Abgasperiode drei Strömungsabschnitte, d. h. für jeden Ofen insgesamt zehn Strömungsabschnitte.

Der Rechnungsgang wurde für sämtliche Strömungsabschnitte, wie in *Zahlentafel 1* als Beispiel wiedergegeben, durchgeführt. Die Umstände, die auf die statischen Druckverhältnisse einwirken, sind längs des Strömungsweges gesondert herausgehoben, so daß ihr Einfluß auf den Druckverlauf und damit dieser selbst genau verfolgt werden kann. Die statischen Drücke wurden an den in Abb. 2 und 3 mit M bezeichneten Stellen gemessen.

Der Druckverlauf im Ofen als Ergebnis der Rechnungen kann auf zweierlei Weise dargestellt werden, einmal als Druckverlauf gegen die Atmosphäre, wobei für den Atmosphärendruck an den jeweiligen Stellen des Ofens gilt

$$h_S = \pm 0 \text{ mm QS},$$

oder als Verlauf der absoluten Drücke. Der Druckverlauf gegen die Atmosphäre entspricht dabei den gemessenen statischen Drücken. Für jeden der untersuchten Oefen wurden zwei Schaubilder entworfen, die der Beheizung von der einen oder von der anderen Seite entsprechen. *Abb. 4 bis 6* zeigen diese Schaubilder für je eine Beheizungsrichtung.

In Abb. 4 entspricht die untere Darstellung dem Druckverlauf gegen die Atmosphäre, die obere dem absoluten Druckverlauf bezogen auf den Druck ± 0 im Ofenraum in Höhe der Gaszüge.

An den Stellen 14 und 15 in Abb. 4 und 5 und den entsprechenden 13 und 14 in Abb. 6 konnte wegen der Unzugänglichkeit nicht gemessen werden. Es ist angenommen, daß dort die tatsächlichen Druckverluste den errechneten entsprechen. Ein nennenswerter Fehler kann hierdurch nicht entstehen, da die betreffenden Druckverluste unter 1,5 mm WS liegen.

Kritische Betrachtung der Ergebnisse der Siemens-Martin-Ofen-Untersuchungen.

Zur kritischen Betrachtung der Ergebnisse sind die Druckverhältnisse, die sich bei den Untersuchungen für die verschiedenen durch Messung erfaßten Abschnitte der Strömungswege ergeben haben, in den *Zahlentafeln 2 bis 5* übersichtlich zusammengefaßt. Nach Abzug der rechnerisch ermittelten Veränderungen des statischen Druckes durch Auftrieb und Veränderung der kinetischen Energie[8]) lassen sich — vorausgesetzt, daß diese rechnerische Ermittlung richtig und zulässig ist — aus den gemessenen Werten die Einzel- und Reibungswiderstände herausschälen. Dies ist in den *Zahlentafeln 6 bis 9* geschehen, wo die so bestimmten Werte unter der Ueberschrift „gemessene" Werte den errechneten Werten gegenübergestellt sind.

Es zeigt sich, daß die aus den Meßwerten bestimmten Druckverluste teils über, teils unter den errechneten liegen.

Im folgenden sind diese Abweichungen näher beschrieben.

1. Strömungsabschnitt: Wechselkanäle bis Kammern.

Zunächst seien einmal die Druckverhältnisse für die Strömungswege von den Wechselkanälen bis über das Gitterwerk (Abb. 2, Ziffer 4 bis 3 und 7 bis 6, dsgl. Abb. 3, Ziffer 4 bis 3 und 8 bis 7) betrachtet. Der Uebergang Wechselkanal—Kammer sowie die Ausmauerung der Kammern ist bei Ofen 3 ähnlich wie bei den Oefen 1 und 2, so daß die gleichen Einzelwiderstände vorliegen und ein Vergleich der drei Oefen möglich ist.

Der Frischgasstrom verliert in den Kammern des Ofens 1 das Vielfache des errechneten Wertes an statischem Druck (Zahlentafel 6). Kleiner ist der gemessene Druckverlust bei Ofen 2; er liegt aber auch hier noch wesentlich höher als der errechnete. Am geringsten sind die Abweichungen von Meß- und Rechenwerten bei Ofen 3, bei dem der gemessene Druckverlust nur ungefähr 150 % des errechneten beträgt.

Es ist also zunächst ein starkes Steigen der gemessenen Druckverluste und damit der Abweichungen von den Rechenwerten mit der Betriebszeit der Oefen festzustellen. (Ofen 3 ist der jüngste Ofen.)

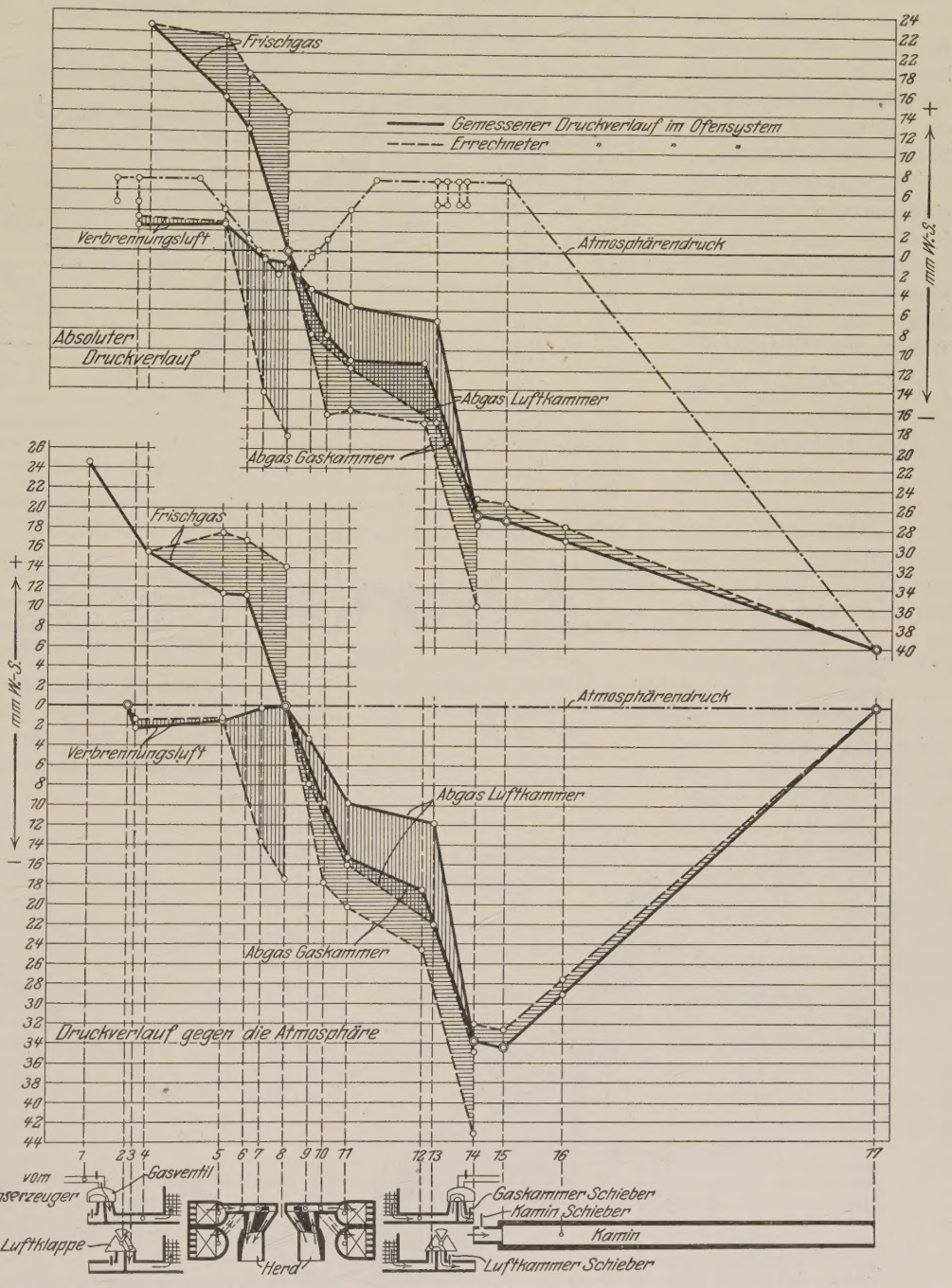

Abbildung 4. Druckverlauf im Ofen 1 während des Ofenganges von links nach rechts.

Die Druckverhältnisse des Frischluftstromes der Oefen 1 und 2 sollen zu diesen Betrachtungen nicht herangezogen werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die gemessenen Druckverluste sehr weit unter den errechneten liegen und deshalb unbedingt eine falsche Mengenannahme vorliegen muß. Die gemessenen Druckverluste sind so klein, daß ein großer Teil der Luftmenge in den Ofen gelangt sein muß, ohne den Weg durch die Luftklappe zu nehmen.

[8]) Ausschließlich der in den Einzelwiderständen enthaltenen Veränderung der kinetischen Energie (siehe Abb. 1).

Die Rechenwerte, die sich auf Grund der in diesem Falle aus der Abgasanalyse erfolgten Mengenbestimmung ergeben haben, erscheinen also nicht einwandfrei genug, um zu eindeutigen Folgerungen zu berechtigen. Bei Ofen 3 stimmen Messung und Rechnung der Druckverluste, die der Frischluftstrom auf dem Wege durch die Luftkammer erleidet, überein (Zahlentafel 7).

Wie schon erwähnt, sind von den Gasmengen in dem durch Messung erfaßten Strömungsabschnitt außer der Reibung an Einzelwiderständen zu überwinden:

1. der Uebergang Wechselkanal—Kammer,
2. das Gitterwerk.

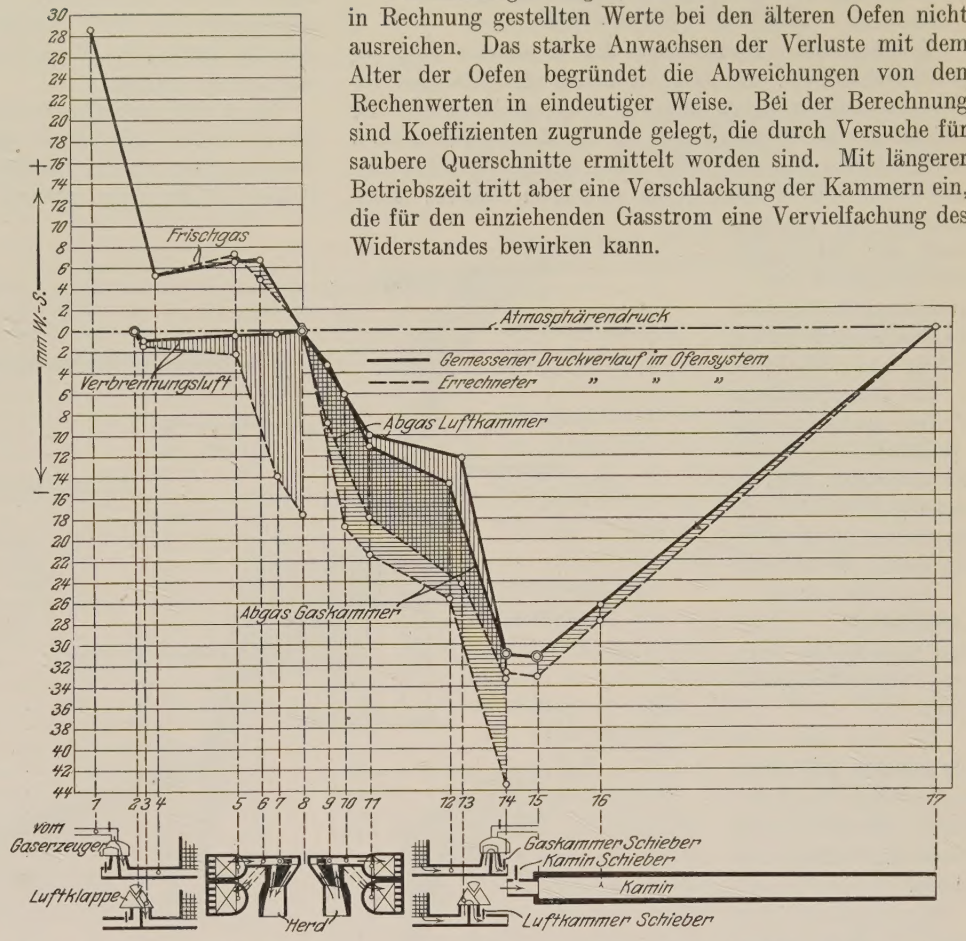

Abbildung 5. Druckverlauf im Ofen 2 während des Ofenganges von links nach rechts.

Die Messungen zeigen, daß die für diese Widerstände in Rechnung gestellten Werte bei den älteren Oefen nicht ausreichen. Das starke Anwachsen der Verluste mit dem Alter der Oefen begründet die Abweichungen von den Rechenwerten in eindeutiger Weise. Bei der Berechnung sind Koeffizienten zugrunde gelegt, die durch Versuche für saubere Querschnitte ermittelt worden sind. Mit längerer Betriebszeit tritt aber eine Verschlackung der Kammern ein, die für den einziehenden Gasstrom eine Vervielfachung des Widerstandes bewirken kann.

Für die durch die Kammern ziehenden Abgasströme (Zahlentafel 8 und 9) ist der Widerstand des Uebergangs Kammer—Kanal anderer Natur. Der Abfall des statischen Druckes ist hier teilweise so gering, daß er nicht einmal zur Erteilung der Beschleunigung beim Eintritt in den Wechselkanal ausreicht, die sich aus dem Querschnittsverhältnis Gitter zu Wechselkanal ergibt. Diese Beobachtung würde dafür sprechen, daß der Abgasstrom nicht den gesamten Gitterquerschnitt ausfüllt und daß infolgedessen die errechnete Erhöhung der kinetischen Energie nicht stattfindet. An anderen Stellen des Strömungsweges ist, wie später gezeigt wird, die gleiche Erscheinung zu finden. Es ist ferner durchaus möglich, daß dieser Strömungsverlauf durch den

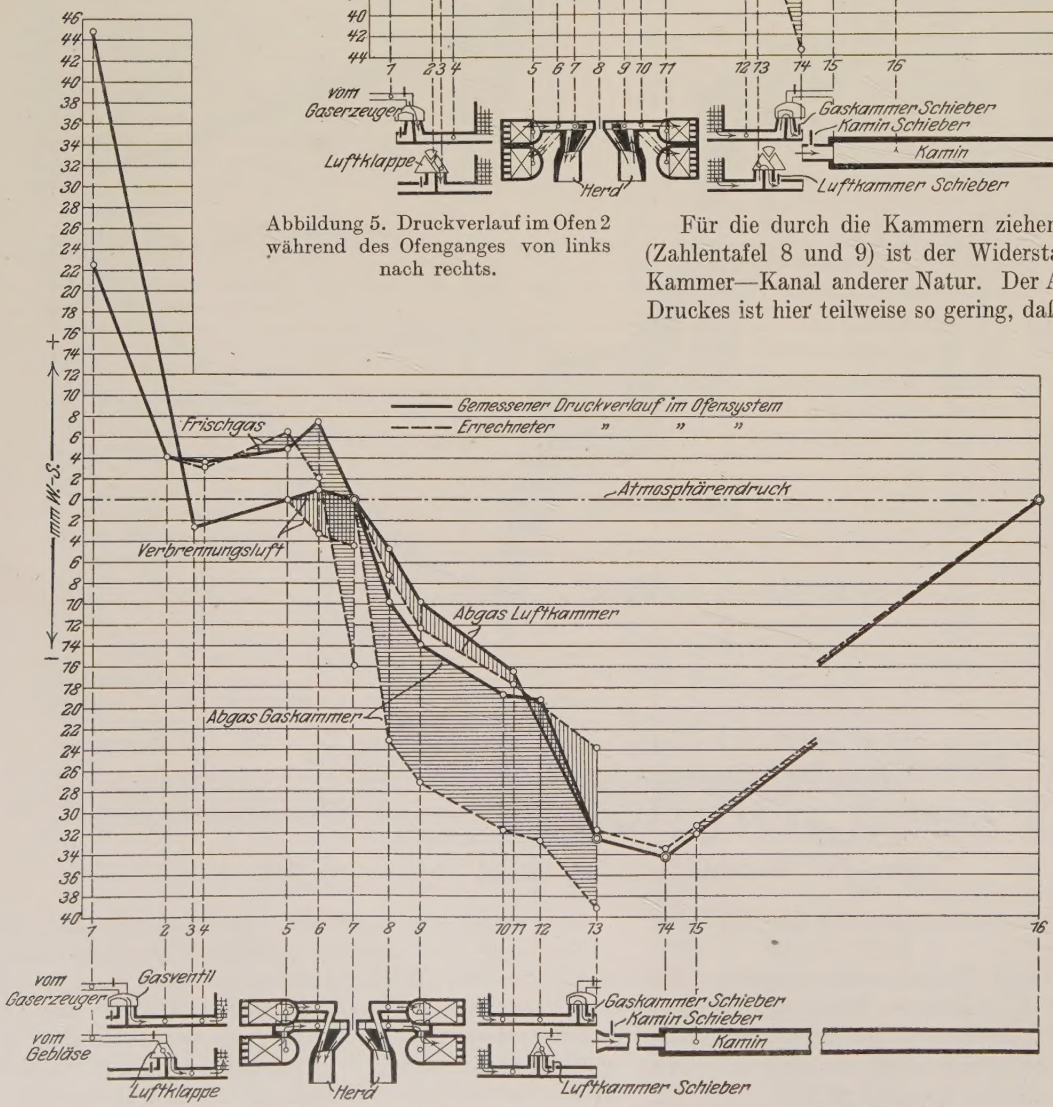

Abbildung 6. Druckverlauf im Ofen 3 während des Ofenganges von links nach rechts.

Zahlentafel 2. Druckverhältnisse des Frischgases bei den Oefen 1, 2 und 3.

Ofen	Strömungsweg	Werte der einzelnen Faktoren der Druckverlustrechnung in mm WS						Druckverlust bzw. Druckgewinn in mm WS	
		Druckverlust				Druckgewinn		errechnet	gemessen
		h_R	h_E	h_A	h_F+h_T	h_A	h_F+h_T		
1 l	Wechselkanal	0,08	0,07	—	0,05	2,13	—	+ 1,93	— 4,17
1 r	bis	0,10	0,10	—	0,04	2,17	—	+ 1,93	— 2,74
2 l	Gaskammer	0,10	0,09	—	0,05	2,25	—	+ 2,01	+ 1,27
2 r	(Abb. 2: 4—3)	0,09	0,08	—	0,04	2,38	—	+ 2,17	+ 1,15
1 l	Gaskammer	0,17	2,70	—	0,17	2,28	—	— 0,76	— 0,17
1 r	bis	0,24	3,81	—	0,22	2,32	—	— 1,95	— 0,46
2 l	Gaszüge	0,27	4,21	—	0,28	2,44	—	— 2,32	+ 0,14
2 r	(Abb. 2: 3—2)	0,23	3,52	—	0,17	2,54	—	— 1,38	+ 0,30
1 l	Gaszüge	0,38	2,20	—	0,99	0,94	—	— 2,63	— 11,17
1 r	bis	0,52	3,06	—	1,37	0,95	—	— 4,00	— 11,19
2 l	Herd	0,58	3,44	—	1,57	0,99	—	— 4,60	— 6,68
2 r	(Abb. 2: 2—1)	0,50	2,76	—	1,14	1,03	—	— 3,37	— 5,13
3 l	Wechselkanal	0,06	0,88	—	—	—	—	— 0,94	— 0,50
3 r	(Abb. 3: 5—4)	0,06	0,68	—	—	—	—	— 0,74	— 0,40
3 l	Wechselkanal bis	0,10	0,15	—	0,01	3,60	—	+ 3,34	+ 1,34
3 r	Gaskammer (Abb. 3: 4—3)	0,09	0,12	—	0,02	3,65	—	+ 3,42	+ 1,31
3 l	Gaskammer bis	0,27	6,94	—	0,12	2,91	—	— 4,42	+ 2,56
3 r	Gaszug (Abb. 3: 3—2)	0,26	6,79	—	0,11	2,97	—	— 4,19	+ 1,76
3 l	Gaszug bis	3,22	14,62	0,99	0,60	1,48	—	— 17,95	— 7,47
3 r	Herd (Abb. 3: 2—1)	2,84	12,92	1,01	0,46	1,51	—	— 15,72	— 7,57

Zahlentafel 3. Druckverhältnisse der Verbrennungsluft bei Ofen 3.

Ofen	Strömungsweg	Werte der einzelnen Faktoren der Druckverlustrechnung in mm WS						Druckverlust bzw. Druckgewinn in mm WS	
		Druckverlust				Druckgewinn		errechnet	gemessen
		h_R	h_E	h_A	h_F+h_T	h_A	h_F+h_T		
3 l	Wechselkanal bis	0,10	0,49	—	0,02	3,24	—	+ 2,63	+ 2,65
3 r	Luftkammer (Abb. 3: 8—7)	0,09	0,41	—	0,03	3,22	—	+ 2,69	+ 2,65
3 l	Luftkammer bis	0,28	6,48	—	0,10	3,36	0,23	— 3,27	+ 0,95
3 r	Luftzüge (Abb. 3: 7—6)	0,24	5,46	—	0,08	3,33	0,19	— 2,26	+ 1,15
3 l	Luftzüge bis	0,41	0,62	1,47	1,03	2,43	—	— 1,10	— 0,95
3 r	Herd (Abb. 3: 6—1)	0,34	0,54	1,47	0,90	2,42	—	— 0,83	— 0,65

baulichen Zustand der Kammern hervorgerufen und begünstigt wird *(Abb. 7)*, so daß die Verringerung der Druckverluste mit längerer Betriebszeit ihre Erklärung findet.

Merkwürdig ist es, daß für die abziehenden Gasströme nicht die nachteilige Wirkung der Kammerverschmutzung festgestellt wurde wie für die einziehenden Ströme.

Eine Erklärung hierfür könnte durch die Art der Veränderung des Gitterwerks während der Ofenreise gegeben sein. Wie *Abb. 8* andeuten mag, wäre es denkbar, daß der Widerstand nur für die eine Strömungsrichtung wächst, während er sich für die andere nicht wesentlich verändert. Dieser Widerstand ist durch die Beschaffenheit der Kanalwandungen bedingt und infolgedessen als zusätzlicher Reibungswiderstand anzusprechen. Die Erklärung gewinnt an Wahrscheinlichkeit durch Beobachtungen, die bei anderen Abschnitten des Ofensystems gemacht wurden[9]).

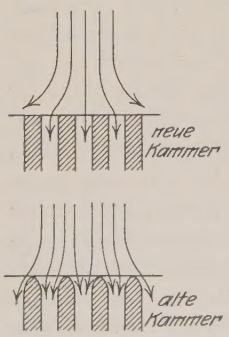

Abbildung 7. Strömungsverlauf.

2. Strömungsabschnitt: Kammern bis Züge.

Bei den Oefen 1 und 2 treten die einziehenden Frischgasströme aus den Kammern unmittelbar in die Züge (Abb. 2, Ziffer 3 bis 2).

Man sollte annehmen, daß der für diesen Strömungsabschnitt gemessene Druckverlust (Zahlentafel 6) für den älteren Ofen kleiner wäre als für den jüngeren, weil die scharfen Kanten an den Zugöffnungen im Laufe des Betriebes durch Abschmelzen abgerundet werden. Es zeigt sich jedoch das Gegenteil. Der ältere Ofen 1 weist an dieser Stelle den größeren Druckverlust auf. Die Druckverluste liegen bei beiden Oefen nicht unerheblich unter den errechneten Werten. Diese Beobachtungen decken sich durchaus mit den schon oben angeführten und lassen sich auf dieselbe Weise erklären. Der Gasstrom füllt nicht den gesamten Kammerquerschnitt aus, sondern zieht gemäß *Abb. 9* in Form eines Stromes von den Wechselkanälen durch die Kammer in die Zugöffnungen, so daß beim Eintritt in die Züge ein geringerer Druckaufwand für Beschleunigung und Kontraktionswiderstand erforderlich ist als bei Ausbreitung des Strömungsmittels über den gesamten Kammerquerschnitt.

Der Einfluß der abgeschmolzenen Kanten tritt zurück

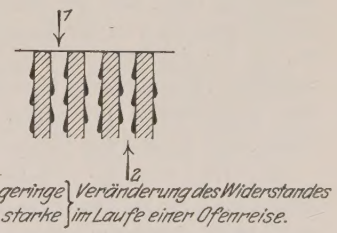

Abbildung 8. Schema für Veränderung des Widerstandes im Laufe einer Ofenreise.

[9]) Siehe die Strömungsabschnitte: Kammern bis Züge und Züge bis Herd.

hinter dem Einfluß sonstiger baulicher Veränderungen der Züge (in ähnlicher Weise wie bei dem Gitterwerk, Abb. 8), die durch ihre Eigenart bei dem älteren Ofen eine starke Erhöhung des Druckverlustes für den einziehenden Gasstrom bewirken.

In Uebereinstimmung mit den für die Kammern gemachten Beobachtungen[10]) wird der abziehende Gasstrom, wie die Messungen zeigen, durch die Veränderung der Züge im Laufe des Betriebes anscheinend nicht betroffen. Die Druckverluste beim Uebergang der Abgase aus den Zügen in die Gaskammern sind bei den Oefen 1 und 2 ungefähr gleich (Zahlentafel 8). Dies ist erklärlich, weil sie in der Hauptsache durch die Schlackensäcke entstehen, in die der Abgasstrom beim Austritt aus den Zügen hineinstößt.

Auch die Messungen des durch die Luftkammern ziehen-

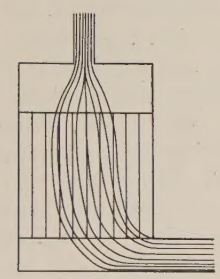

Abbildung 9. Schematische Darstellung des Strömungsverlaufs in einer Siemens-Martin-Ofenkammer.

Zahlentafel 4. Druckverhältnisse des durch die Gaskammern ziehenden Abgases bei den Oefen 1, 2 und 3.

Ofen	Strömungsweg des Abgases	Werte der einzelnen Faktoren der Druckverlustrechnung in mm WS						Druckverlust bzw. Druckgewinn in mm WS	
		Druckverlust				Druckgewinn		errechnet	gemessen
		h_R	h_E	h_A	h_F+h_T	h_A	h_F+h_T		
1 l	Herd	0,70	12,76	0,97	—	—	1,89	— 12,54	— 8,9
1 r	bis	0,98	18,50	0,98	—	—	2,67	— 17,79	— 9,75
2 l	Gaszüge	0,92	16,50	1,00	—	—	2,87	— 15,55	— 5,4
2 r	(Abb. 2: 1—2)	1,07	19,52	1,00	—	—	2,83	— 18,76	— 6,05
1 l	Gaszüge	0,30	—	2,35	—	—	0,36	— 2,29	— 4,6
1 r	bis	0,46	—	2,41	—	—	0,34	— 2,53	— 5,55
2 l	Gaskammer	0,43	—	2,44	—	—	0,28	— 2,59	— 5,6
2 r	(Abb. 2: 2—3)	0,48	—	2,46	—	—	0,33	— 2,61	— 4,95
1 l	Gaskammer	0,12	1,13	2,15	—	—	0,01	— 3,39	— 3,08
1 r	bis	0,21	1,81	2,26	—	—	0,01	— 4,27	— 3,26
2 l	Wechselkanal	0,17	1,50	2,28	—	—	0,02	— 3,93	— 3,43
2 r	(Abb. 2: 3—4)	0,21	1,74	2,31	—	—	0,02	— 4,24	— 3,65
1 l	Wechselkanal	0,79	11,18	1,46	—	6,77	0,10	— 6,56	—
1 r	bis	1,20	17,97	1,60	—	6,88	0,19	— 13,70	— 10,44
2 l	Kamin	0,99	14,77	1,53	—	7,04	0,13	— 10,12	— 13,07
2 r	(Abb. 2: 4—8)	1,10	17,17	1,58	—	6,87	0,13	— 12,75	— 11,55
1 l		0,08	—	—	—	27,98	0,01	+ 27,91	—
1 r	Kamin	0,09	—	—	—	27,46	0,01	+ 27,38	+ 29,0
2 l		0,08	—	—	—	29,00	0,01	+ 28,93	+ 27,5
2 r		0,06	—	—	—	27,79	0,01	+ 27,74	+ 26,2
3 l	Herd bis	3,87	22,92	1,50	—	1,01	0,77	— 26,51	— 10,6
3 r	Gaszug (Abb. 3: 1—2)	3,44	19,85	1,52	—	1,02	0,71	— 23,08	— 9,8
3 l	Gaszug bis	0,33	0,99	2,96	—	—	0,22	— 4,06	— 3,9
3 r	Gaskammer (Abb. 3: 2—3)	0,31	0,86	3,01	—	—	0,15	— 4,03	— 4,1
3 l	Gaskammer bis	0,11	1,00	3,68	—	—	0,02	— 4,77	— 5,12
3 r	Wechselkanal (Abb. 3: 3—4)	0,11	0,80	3,72	—	—	0,02	— 4,61	— 4,81
3 l	Wechselkanal	0,06	1,12	—	—	—	—	— 1,18	— 0,60
3 r	(Abb. 3: 4—5)	0,08	0,88	—	—	—	—	— 0,94	— 0,50
3 l	Wechselkanal bis	1,03	9,61	1,66	—	3,94	0,06	— 8,30	— 13,78
3 r	Kamin (Abb. 3: 5—9)	1,02	7,56	1,65	—	3,88	0,04	— 6,31	— 12,79
3 l	Kamin	0,13	—	—	—	32,04	0,02	+ 31,93	+ 34,0
3 r		0,13	—	—	—	31,44	0,01	+ 31,32	+ 32,0

den Abgasstromes in den Oefen 1 und 2 zeigen keine Unterschiede des Druckverlustes zwischen Zügen und Kammern (Zahlentafel 9). Man hat hier in dem betreffenden Strömungsabschnitt noch einen Richtungswechsel um 45° (Abb. 2, Ziffer 5 bis 6). Ein Vergleich von Messung und Rechnung zeigt, daß der Widerstandskoeffizient für diesen Richtungswechsel in der Berechnung zu hoch angenommen ist, da der sich nach ihm ergebende Druckverlust den gemessenen Gesamtverlust übersteigt. Diese Beobachtung für den Druckverlust bei einem Richtungswechsel von 45° findet man an anderer Stelle des Ofensystems bestätigt[11]).

Bei Ofen 3 ist der Uebergang aus den Kammern in die Züge anders als bei den Oefen 1 und 2 (Abb. 3, Ziffer 3 bis 2 und 7 bis 6). Auch hier hat man aber sowohl für den Frischgas- als auch für den Luftstrom im wesentlichen den Einzelwiderstand durch Querschnittsverengung, und es zeigt sich, wie bei den Oefen 1 und 2, daß der errechnete Druckverlust erheblich über dem gemessenen liegt (Zahlentafel 6 und 7). Dadurch wird die oben aufgestellte Vermutung eines wulstartigen Verlaufs der Strömung (Abb. 9) erneut bestätigt.

Im Abgasstrom entsprechen die für den Uebergang aus dem Gaszug in die Gaskammer des Ofens 3 (Richtungswechsel in einem breiten Querschnitt, Abb. 3, Ziffer 2 bis 3) gemessenen Druckverluste (Zahlentafel 8) ungefähr den errechneten Werten.

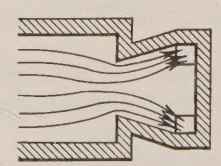

Abbildung 10. Schematische Darstellung des Strömungsverlaufs in Herd und Luftzug (in einer Ebene gedacht).

Für den Uebergang aus den Luftzügen in die Luftkammer von Ofen 3 (Abb. 3, Ziffer 6 bis 7) zeigt sich die schon wiederholt für den Uebergang aus weiten in enge Querschnitte

[10]) Siehe Strömungsabschnitt: Wechselkanäle bis Kammern.
[11]) Siehe Strömungsabschnitt: Gaswechselkanäle (Ofen 3).

Zahlentafel 5. Druckverhältnisse des durch die Luftkammern ziehenden Abgases bei den Oefen 1, 2 und 3.

Ofen	Strömungsweg des Abgases	Werte der einzelnen Faktoren der Druckverlustrechnung in mm WS						Druckverlust bzw. Druckgewinn in mm WS	
		Druckverlust				Druckgewinn		errechnet	gemessen
		h_R	h_E	h_A	h_F+h_T	h_A	h_F+h_T		
1 l	Herd	0,36	7,20	1,49	—	1,01	1,75	— 6,29	— 2,35
1 r	bis	0,44	9,19	1,47	—	0,99	2,26	— 7,85	— 3,3
2 l	Luftzüge	0,44	9,17	1,50	—	1,02	2,22	— 7,87	— 3,0
2 r	(Abb. 2: 1—5)	0,50	10,24	1,51	—	1,02	2,44	— 8,79	— 3,25
1 l	Luftzüge	0,78	3,02	3,91	—	—	0,27	— 7,44	— 7,15
1 r	bis	0,99	3,78	3,82	—	—	0,42	— 8,17	— 6,5
2 l	Luftkammer	1,00	3,81	3,95	—	—	0,37	— 8,39	— 6,8
2 r	(Abb. 2: 5—6)	1,14	4,28	3,98	—	—	0,41	— 8,99	— 6,75
1 l	Luftkammer	0,25	3,68	2,28	—	—	0,07	— 6,14	— 2,0
1 r	bis	0,35	5,14	2,25	—	—	0,11	— 7,63	— 2,0
2 l	Luftklappe	0,34	4,78	2,33	—	—	0,08	— 7,37	— 2,7
2 r	(Abb. 2: 6—7)	0,38	5,44	2,35	—	—	0,10	— 8,07	— 2,2
1 l	Luftklappe	0,48	9,17	1,78	1,51	6,93	0,02	— 5,99	—
1 r	bis	0,49	10,06	1,73	1,07	6,91	0,06	— 6,38	— 17,2
2 l	Kamin	0,39	8,32	1,77	0,59	7,18	0,03	— 3,86	— 15,0
2 r	(Abb. 2: 7—8)	0,26	7,62	1,67	—	6,98	0,07	— 2,50	— 14,0
3 l	Herd bis	0,73	9,11	2,52	—	1,53	1,91	— 8,82	— 4,5
3 r	Luftzüge (Abb. 3: 1—6)	0,56	7,13	2,50	—	1,52	1,48	— 7,19	— 4,75
3 l	Luftzüge bis	0,53	2,92	3,50	—	—	1,38	— 5,57	— 5,1
3 r	Luftkammer (Abb. 3: 6—7)	0,41	2,31	3,47	—	—	1,10	— 5,09	— 5,05
3 l	Luftkammer bis	0,16	2,38	3,56	—	—	0,03	— 6,07	— 6,72
3 r	Wechselkanal (Abb. 3: 7—8)	0,14	1,80	3,51	—	—	0,03	— 5,42	— 6,72
3 l	Wechselkanal bis	1,04	9,54	1,32	—	3,64	0,15	— 8,11	— 17,68
3 r	Kamin (Abb. 3: 8—9)	0,85	7,20	1,23	—	3,51	0,06	— 5,71	— 15,48

beobachtete Erscheinung, daß die Meßwerte unter den Rechenwerten liegen (Zahlentafel 9), d. h. unter der Annahme, daß der Reibungswiderstand nicht kleiner ist als errechnet, daß der Einzelwiderstandskoeffizient für die Verengerung zu hoch eingesetzt ist. Die Abweichungen sind in diesem Falle allerdings nur sehr gering; dies ist aber begründet, weil an der Stelle doch eine erhebliche Störung der Strömung stattfindet, die zu ihrer Ueberwindung fast den errechneten Druckaufwand erfordert.

3. Strömungsabschnitt: Züge bis Herd.

Starke Abweichungen der Meßergebnisse von der Rechnung zeigen sich wieder für den Strömungsweg von den Gas- bzw. Luftzügen in den Herd und umgekehrt (Abb. 2, Ziffer 2 bis 1 und 5 bis 1, Abb. 3, Ziffer 2 bis 1 und 6 bis 1).

Das Frischgas hat bei den Oefen 1 und 2 lediglich einen Richtungswechsel um 90° durchzumachen (Abb. 2, Ziffer 2 bis 1). Der für diesen Richtungswechsel und die Reibung gemessene Druckverlust übersteigt den errechneten bei beiden Oefen und ist bei Ofen 1 ungefähr doppelt so groß wie bei Ofen 2 (Zahlentafel 6). Diese Abweichungen können auf eine starke Erhöhung des Reibungsverlustes durch den baulichen Zustand der Züge zurückzuführen sein. Es wird später gezeigt, daß diese Erklärung, die ja auch schon für andere Abschnitte des Ofensystems gegeben wurde[12]), richtig zu sein scheint.

Die Druckverluste des Abgases, das auf demselben Wege vom Herd in die senkrechten Gaszüge (Abb. 2, Ziffer 1 bis 2) zieht, sind der Messung nach kleiner, als sie die Rechnung ergibt (Zahlentafel 8). Nach den früheren Ausführungen über den Strömungsverlauf bei Querschnittsverengerung[12]) ist es wahrscheinlich, daß die Feuergase vor den Zügen nicht den gesamten freien Querschnitt ausfüllen, sondern in Form eines Stromes durch den Herdraum ziehen und infolgedessen beim Eintritt in die Züge eine geringere Beschleunigung und einen geringeren Kontraktionsverlust erleiden, als in der Rechnung angenommen wurde.

Bei Ofen 3 hat der Frischgasstrom außer der Reibung den Widerstand eines Richtungswechsels um 90° bei gleichzeitiger Querschnittsverengerung zu überwinden (Abb. 3, Ziffer 2 bis 1). Die hier gemessenen Druckverluste sind nicht nur kleiner als die errechneten, sondern decken noch nicht einmal den erforderlichen Aufwand an Beschleunigung (Zahlentafel 6). Eine Erklärung durch Strömungsverhältnisse ist in diesem Falle nicht möglich.

Es ist anzunehmen, daß der Querschnitt des schrägen Zuges nicht den Abmessungen der für die Rechnung benutzten Ofenzeichnung entspricht; d. h., daß der Gaszug im Betrieb ausgeschmolzen und dadurch der Durchgangsquerschnitt vergrößert war[13]).

Die Beobachtungen an dem einziehenden Gasstrom des Ofens 3 wurden durch die Messungen an dem durch den Gaszug strömenden Abgas bestätigt (Zahlentafel 8). Auch hier ist der Druckabfall beim Eintritt in den Gaszug so gering, daß er nicht mehr allein durch Strömungsverhältnisse erklärt werden kann und man annehmen muß, daß der Rechnung falsche Querschnittsgrößen zugrunde liegen.

Der gemessene Druckverlust der Frischluft des Ofens 3 beim Uebergang aus den senkrechten Zügen in den schrägen Zug liegt ein wenig unter dem errechneten. Unter der Voraussetzung, daß die vorhandenen Reibungsverluste nicht kleiner sind als die errechneten, ist der Einzelwiderstandskoeffizient für den Richtungswechsel aus einem engen in einen weiten Querschnitt für diesen Fall etwas zu hoch angenommen.

Die Abgase, die durch den schrägen Luftzug in die senkrechten Züge ziehen, benötigen dazu sowohl bei den Oefen 1 und 2 (Abb. 2, Ziffer 1 bis 5) als auch bei Ofen 3 (Abb. 3,

[12]) Siehe Strömungsabschnitte: Wechselkanäle bis Kammern und Kammern bis Züge.

[13]) Der Augenschein deutete darauf hin. Eine Querschnittsnachmessung an dem Ofen im Betriebszustand war nicht möglich.

Zahlentafel 6.
Druckverluste durch Einzel- und Reibungswiderstände für Frischgas bei den Oefen 1, 2 und 3.

Ofen	Strömungsweg des Gases	Auftretende Einzelwiderstände	Druckverlust in mm WS			
			errechnet			gemess.
			h_E	h_R	h_E+h_R	h_E+h_R
3 l 3 r	Wechselkanal (Abb. 3:5–4)	zweimal Richtungswechsel um 45°	0,88 0,68	0,06 0,06	0,94 0,74	0,50 0,40
1 l 1 r 2 l 2 r	Wechselkanal bis Gaskammer (Abb. 2:4–3)	Eintritt aus dem Wechselkanal in die Kammer und das Gitterwerk	0,07 0,10 0,09 0,08	0,08 0,10 0,10 0,09	0,15 0,20 0,19 0,17	6,26 4,97 0,94 1,20
3 l 3 r	Wechselkanal bis Gaskammer (Abb. 3:4–3)	wie bei den Oefen 1 und 2	0,15 0,12	0,10 0,09	0,25 0,21	0,35 0,32
1 l 1 r 2 l 2 r	Gaskammer bis Gaszüge (Abb. 2:3–2)	Eintritt aus den weiten Kammern in die engen Züge	2,70 3,81 4,21 3,52	0,17 0,24 0,27 0,23	2,87 4,05 4,48 3,75	2,28 2,56 2,02 2,07
3 l 3 r	Gaskammer bis Gaszug (Abb. 3:3–2)	Durchgang von der Kammer zur Vorkammer und Eintritt in die Züge	6,94 6,79	0,27 0,26	7,21 7,05	3,21 3,11
1 l 1 r 2 l 2 r	Gaszüge bis Herd (Abb. 2:2–1)	Richtungswechsel um 90°	2,20 3,06 3,44 2,76	0,38 0,52 0,58 0,50	2,58 3,58 4,02 3,26	11,12 10,77 6,10 5,02
3 l 3 r	Gaszug bis Herd (Abb. 3:2–1)	Richtungswechsel um 90° in einen engeren Querschnitt	14,62 12,96	3,22 2,84	17,84 13,80	7,36 7,61

Ziffer 1 bis 6) einen geringeren Druckaufwand als errechnet (Zahlentafel 9). Als Einzelwiderstände hat man in diesem Strömungsabschnitt für sämtliche Oefen den Uebergang aus dem Herd in den schrägen Zug sowie den Richtungswechsel in die senkrechten engen Züge.

Auch hier könnte man die Abweichungen bei Ausschaltung von Querschnittsänderungen nur durch Strömungsverhältnisse erklären, wie es oben wiederholt[14]) beschrieben ist. Die Strömung würde in den Luftzügen der Ofenköpfe gemäß der Darstellung in *Abb. 10* verlaufen.

Zahlentafel 7. Druckverluste durch Einzel- und Reibungswiderstände für Luft bei Ofen 3.

Ofen	Strömungsweg der Luft	Auftretende Einzelwiderstände	Druckverlust in mm WS			
			errechnet			gemessen
			h_E	h_R	h_E+h_R	h_E+h_R
3 l 3 r	Wechselkanal bis Luftkammer (Abb. 3:8–7)	Eintritt aus dem Wechselkanal in die Kammer und das Gitterwerk	0,49 0,41	0,10 0,09	0,59 0,50	0,57 0,59
3 l 3 r	Luftkammer bis Luftzüge (Abb. 3:7–6)	Durchgang von der Kammer zur Vorkammer und Eintritt in die Züge	6,48 5,46	0,28 0,24	6,76 5,70	2,54 2,29
3 l 3 r	Luftzüge bis Herd (Abb. 3:6–1)	Uebergang aus den senkrechten Zügen in den schrägen Zug	0,62 0,54	0,41 0,34	1,03 0,88	0,88 0,70

4. Strömungsabschnitt: Gaswechselkanäle (Ofen 3).

In den Gaskanälen des Ofens 3 ist neben den Reibungsverlusten der Druckverlust des strömenden Mittels durch einen zweimaligen Richtungswechsel um 45° (Abb. 3, Ziffer 4 bis 5) gemessen. In sehr eindeutiger Weise liegen die Meßwerte ~ 50 % unter den errechneten Verlusten (Zahlentafel 6 und 8), d. h. der Einzelwiderstandskoeffizient

[14]) Siehe Strömungsabschnitte: Wechselkanäle bis Kammern, Kammern bis Züge und Züge bis Herd.

Zahlentafel 8. Druckverluste durch Einzel- und Reibungswiderstände für Abgas (Gaskammern) bei den Oefen 1, 2 und 3.

Ofen	Strömungsweg des Abgases	Auftretende Einzelwiderstände	Druckverlust in mm WS			
			errechnet			gemessen
			h_E	h_R	h_E+h_R	h_E+h_R
1 l 1 r 2 l 2 r	Herd bis Gaszüge (Abb. 2:1–2)	Eintritt aus dem Herd in die engen Gaszüge und Richtungswechsel um 90°	12,76 18,50 16,50 19,52	0,70 0,98 0,92 1,07	13,46 19,48 17,42 20,59	9,82 11,44 7,27 7,88
3 l 3 r	Herd bis Gaszug (Abb. 3:1–2)	Eintritt aus dem Herd in den engen Gaszug und Richtungswechsel um 90° in weiten Querschnitt	22,92 19,85	3,87 3,44	26,79 23,29	10,88 10,01
1 l 1 r 2 l 2 r	Gaszüge bis Gaskammer (Abb. 2:2–3)	Schlackensack	nicht er-rech-net	0,30 0,46 0,43 0,48	— — — —	2,61 3,48 3,44 2,72
3 l 3 r	Gaszug bis Gaskammer (Abb. 3:2–3)	Uebergang aus dem Gaszug in die Gaskammer	0,99 0,86	0,33 0,31	1,32 1,17	1,16 1,24
1 l 1 r 2 l 2 r	Gaskammer bis Wechselkanal (Abb. 2:3–4)	Gitterwerk und Eintritt in den Wechselkanal	1,13 1,81 1,50 1,74	0,12 0,21 0,17 0,21	1,25 2,02 1,67 1,95	0,94 1,01 1,17 1,36
3 l 3 r	Gaskammer bis Wechselkanal (Abb. 3:3–4)	wie bei Oefen 1 und 2	1,00 0,80	0,11 0,11	1,11 0,91	1,46 1,11
3 l 3 r	Wechselkanal (Abb. 3:4–5)	zweimal Richtungswechsel um 45°	1,12 0,88	0,06 0,06	1,18 0,94	0,60 0,50
1 l 1 r 2 l 2 r	Wechselkanal bis Kamin (Abb. 2:4 8)	Richtungswechsel um rd. 70° im Wechselkanal, 90° zum Gasventil, 180° im Gasventil, 90° zum Essenanal, Schieber und Richtungswechsel um 90° in weiten Querschnitt (Kamin)	11,18 17,97 14,77 17,17	0,79 1,20 0,99 1,10	11,97 19,17 15,76 18,27	— 15,91 18,71 16,97
3 l 3 r	Wechselkanal bis Kamin (Abb. 3:5–9)	Richtungswechsel um 90° zum Gasventil, 180° im Gasventil, 90° in weiten Querschnitt (Essenkanal), Schieber, Querschnittsverengerung, Richtungswechsel um 90° in weiten Querschnitt (Kamin)	9,61 7,56	1,03 1,02	10,64 8,58	16,12 15,06

ist — den Reibungsverlust wegen seiner absoluten Geringfügigkeit ausgeschaltet — nur halb so groß wie der in die Rechnung eingesetzte. Entsprechende Beobachtungen waren schon oben für eine ähnliche Stelle des Ofensystems gemacht worden[15]).

5. Strömungsabschnitt: Wechselkanäle bis Kamin.

Auf dem Wege von den Wechselkanälen zum Kamin (Abb. 2, Ziffer 7 bis 8 und 4 bis 8, Abb. 3, Ziffer 5 bis 9 und 8 bis 9) sind von den Abgasströmen außer dem Reibungswiderstand eine ganze Reihe der verschiedensten Einzelwiderstände zu überwinden (Zahlentafel 8 und 9). Der Hauptanteil an diesen Widerständen entfällt auf die Gasventile bzw. Luftklappen.

Für den Abgasweg durch die Gasventile der Oefen 1 und 2 stimmen die gemessenen und die errechneten Druckverluste leidlich überein. Für die übrigen Abgaswege betragen die Rechenwerte nur ~ 50 % der Meßwerte. Diese Abweichungen sind nicht befremdend. Es ist sicher, daß der Störungseinfluß der Ventile und Klappen bei den verhältnismäßig großen Gasgeschwindigkeiten schon mit kleinen baulichen Verschiedenheiten stark schwankt und nicht wie ein

[15]) Siehe Strömungsabschnitt: Kammern bis Züge.

einfacher Richtungswechsel durch einen gemeingültigen Koeffizienten erfaßt werden kann.

Die Druckverluste in diesem Strömungsabschnitt werden nach den Versuchsergebnissen von der Betriebszeit der Oefen und der dadurch bedingten Verschmutzung der Kanäle nicht merklich beeinflußt.

Zusammenfassung.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Untersuchungen dieser Arbeit starke Abweichungen in den Ergebnissen von Messung und Rechnung der Druckverluste in Siemens-Martin-Oefen ergeben haben. Diese Abweichungen liegen sowohl in der Berechnung der Reibungsverluste als auch in der Berechnung der Stoßverluste begründet. Dabei spielt die Länge der Betriebszeit des untersuchten Ofens eine große Rolle.

Die Betriebszeit beeinflußt sowohl Reibungs- als auch Stoßverluste mittelbar durch den baulichen Zustand des Ofens. Dabei hat man zu unterscheiden zwischen Verschmutzung bzw. Verschlackung und Ausschmelzung. Beide Erscheinungen können sich überdecken.

Ausschmelzungen der Strömungswege können erklärlicherweise starke Abweichungen zwischen gemessenen Druckverlusten und errechneten bringen. Besonders in den heißen Ofenköpfen spielen sie eine Rolle. Da man ihre Größe nicht kennt, erschweren sie, ebenso wie die Verschlackungen, einen genauen Vergleich des gemessenen Druckverlustes mit dem für Reibung und Einzelwiderstand errechneten. Eine Vergrößerung der Reibungsverluste bei höheren Gastemperaturen infolge der vergrößerten Zähigkeit des Strömungsmittels konnte nicht festgestellt werden.

Der Einfluß der Zähigkeit ist jedenfalls gegenüber den anderen oben erwähnten Beeinflussungen der Ofenwiderstände unbeträchtlich.

Aus übereinstimmenden Gründen ist zu schließen, daß die Gasströme durch Herd und Kammern einen wulstartigen Verlauf nehmen.

Diese Feststellung bestätigt sowohl die Beobachtungen von Schleicher über den Strömungsverlauf in seiner Modellkammer[16]) als auch die Beobachtungen von Neumann bei Temperaturmessungen in Siemens-Martin-Ofenkammern[17]).

Der wulstartige Strömungsverlauf hat zur Folge, daß die im Schrifttum angegebenen ζ-Werte für die Druckverluste bei plötzlicher Querschnittsverengerung[18]) nicht uneingeschränkt auf die Verhältnisse beim Siemens-Martin-Ofen zu übertragen sind.

Der ζ-Wert für einen Richtungswechsel von 45° ist nicht so hoch gefunden worden, wie von Bansen angegeben (1,0). Er entspricht ungefähr der Brabbéeschen Angabe (0,5).

Hauptdruckverlustquellen sind Umsteuervorrichtungen und Ofenköpfe. Für Bau und Betrieb ergibt sich als Folgerung eine sorgsame Beachtung dieser Stellen.

In den Umsteuervorrichtungen sind weite Querschnitte und gute Stromführung Bedingung für geringe Druckverluste. An den Köpfen ist ständige Ueberwachung und Ausbesserung der Züge erforderlich. Die Anwendung des Torkret-Verfahrens, das sich hierfür in Amerika schon teilweise eingeführt hat, wird die Arbeit wesentlich vereinfachen.

[16]) Ber. Stahlwerksaussch. V. d. Eisenh. Nr. 123 (1927).
[17]) Ber. Stahlwerksaussch. V. d. Eisenh. Nr. 127 (1927).
[18]) Siehe Abb. 1.

Zahlentafel 9. Druckverluste durch Einzel- und Reibungswiderstände für Abgas (Luftkammern) bei den Oefen 1, 2 und 3.

Ofen	Strömungsweg des Abgases	Auftretende Einzelwiderstände	Druckverlust in mm WS			
			errechnet			gemessen
			h_E	h_R	h_E+h_R	h_E+h_R
1 l	Herd bis Luftzüge (Abb. 2: 1–5)	Eintritt aus dem Herd in den schrägen Luftzug und Eintritt aus diesem in die senkrechten Züge	7,20	0,36	7,56	3,82
1 r			9,19	0,44	9,63	5,08
2 l			9,17	0,44	9,61	4,74
2 r			10,24	0,50	10,74	5,20
3 l	Herd bis Luftzüge (Abb. 3: 1–6)	wie bei Oefen 1 u. 2	9,11	0,73	9,84	5,42
3 r			7,13	0,56	7,69	5,25
1 l	Luftzüge bis Luftkammer (Abb. 2: 5–6)	Richtungswechsel um 45° und Schlackensack	[1])3,02	0,78	[1])3,80	3,51
1 r			[1])3,78	0,99	[1])4,77	3,10
2 l			[1])3,81	1,00	[1])4,81	3,22
2 r			[1])4,28	1,14	[1])5,42	3,18
3 l	Luftzüge bis Luftkammer (Abb. 3: 6–7)	Uebergang von der Vorkammer zur Luftkammer	2,92	0,53	3,45	2,98
3 r			2,31	0,41	2,72	2,68
1 l	Luftkammer bis Luftklappe (Abb. 2: 6–7)	Gitterwerksein- und -austritt, Eintritt in den Wechselkanal, Richtungswechsel um 90°	3,68	0,25	3,93	1,41
1 r			5,14	0,35	5,49	1,49
2 l			4,78	0,34	5,12	2,12
2 r			5,44	0,38	5,82	1,64
3 l	Luftkammer bis Wechselkanal (Abb. 3: 7–8)	Gitterwerk und Eintritt in den Wechselkanal	2,38	0,16	2,54	3,19
3 r			1,80	0,14	1,94	3,24
1 l	Luftklappe bis Kamin (Abb. 2: 7–8)	Richtungswechsel in der Luftklappe um 90° zum Essenkanal, Schieber und Richtungswechsel um 90° in breiten Querschnitt (Kamin)	9,17	0,48	9,65	—
1 r			10,06	0,49	10,55	21,37
2 l			8,32	0,39	8,71	19,85
2 r			7,62	0,26	7,88	19,38
3 l	Wechselkanal bis Kamin (Abb. 3: 8–9)	Richtungswechsel um 45° im Wechselkanal, 90° zur Luftklappe, 180° in der Luftklappe, 90° in weiten Querschnitt (Essenkanal), Schieber, Verengung u. Richtungswechsel um 90° in breiten Querschnitt (Kamin)	9,54	1,04	10,58	20,15
3 r			7,20	0,85	8,05	17,82

[1]) Nur für den Richtungswechsel, für Schlackensack nicht errechnet.

Der Verschlackung des Gitterwerks wurde auf einem rheinischen Stahlwerk durch zeitweiliges Einspritzen von Wasser mit Erfolg vorgebeugt.

Für die Zuführung der Verbrennungsluft wird sich immer ein Ventilator empfehlen. Mit ihm hat man es in der Hand, den Luftdruck zu regeln und kann die Luft gegebenenfalls auch durch größere Verstopfungen im Ofeninnern drücken. Außerdem ist die Luftmenge einfach zu messen und dadurch die Verbrennung fortlaufend zu überwachen. Desgleichen sind besondere Abgasschieber hinter Luft- und Gaskammern zu empfehlen, damit die Verteilung der Abgase auf die beiden Kammern geregelt werden kann.

Allgemein ist zur Berechnung von Siemens-Martin-Oefen zu sagen, daß die bislang bekannten Unterlagen zur Nachrechnung eines Ofens nicht ausreichen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit geben Aufschluß über die Art der Abweichungen der tatsächlichen Druckverluste von den errechneten und liefern damit einen Beitrag für die Berechnung neuer Oefen.

Die Druckverluste durch Einzelwiderstände in einem neuen Ofen etwa von der Bauart der untersuchten Oefen 1 und 2 würden genügend genau erfaßt werden durch die Anwendung folgender Koeffizienten:

für Uebergang	Wechselkanal bis Kammer	$\zeta = \sim 0{,}3$
„	Kammer bis Wechselkanal	$\zeta = \sim 1{,}5$
„	Gitterwerk[19])	$\zeta = \sim 3{,}0—4{,}5$
„	Kammer bis Züge . . .	$\zeta = \sim 1$
Richtungswechsel	90° in den Zügen	$\zeta = \sim 1{,}0$
„	45° in den Zügen	$\zeta = \sim 0{,}5$
Uebergang	Herd — Gaszüge }	$\zeta = \sim 1$
„	Herd — Luftzüge }	
„	schräger Luftzug — senkrechter Luftzug . .	$\zeta = \sim 1$
„	senkrechter Luftzug — schräger Luftzug	$\zeta = \sim 0{,}3$

[19]) Ber. Stahlwerksaussch. V. d. Eisenh. Nr. 111 (1926) S. 11 ff.

Die Gesamtverluste von den Wechselkanälen bis in den Herd würden sich ungefähr folgendermaßen zusammensetzen:

Einziehende Ofenhälfte:	10 bis 15 %	Reibung,
	60 bis 65 %	Einzelwiderstände,
	25 bis 30 %	Beschleunigung.
Abziehende Ofenhälfte:	5 bis 10 %	Reibung,
	55 bis 60 %	Einzelwiderstände,
	30 bis 35 %	Gegenauftrieb.

Der Rechnungsgang geht mit genügender Klarheit aus Zahlentafel 1 hervor.

Für die wertvollen Anregungen, welche Herr Dr.-Ing. K. Rummel von der Wärmestelle Düsseldorf und Herr Professor Dr.-Ing. E. h. W. Tafel von der Technischen Hochschule Breslau zu der vorstehenden Arbeit gegeben haben, sei ihnen auch an dieser Stelle bestens gedankt.

Schrifttumsübersicht.

1. Bansen, H.: Leistung und Wirkungsgrad als Unterlagen für Bau und Berechnung der Siemens-Martin-Oefen. Ber. Stahlwerksaussch. V. d. Eisenh. Nr. 82.
2. Bansen, H.: Einfluß der Vorwärmung von Gas und Luft auf den Gang des Siemens-Martin-Ofens. Ber. Stahlwerksaussch. V. d. Eisenh. Nr. 92.
3. Bansen, H.: Beiträge zur Untersuchung der Vorgänge im Siemens-Martin-Ofen. Ber. Stahlwerksaussch. V. d. Eisenh. Nr. 111.
4. Bansen, H.: Berechnung des Druckabfalls in Gasleitungen und gemauerten Kanälen. Ber. Stahlwerksaussch. V. d. Eisenh. Nr. 129; Arch. Eisenhüttenwes. 1 (1927) S. 187/92.
5. Blaeß, Viktor: Die Strömung in Röhren. (München u. Berlin: R. Oldenbourg 1911.)
6. Dichmann, C.: Der basische Herdofenprozeß. (Berlin: Julius Springer 1920.)
7. Diepschlag, E.: Ueber neuere Bauarten von Martin-Ofenköpfen. Ber. Stahlwerksaussch. V. d. Eisenh. Nr. 67.
8. Herzog, E.: Der heutige Stand unserer Kenntnisse vom Siemens-Martin-Ofen. Ber. Stahlwerksaussch. V. d. Eisenh. Nr. 120.
9. Jordan, H.: Die Mengenmessung von Gasen, Dampf und Flüssigkeiten auf Hüttenwerken. Mitt. Wärmestelle V. d. Eisenh. Nr. 76.
10. Kahlenberg, R.: Die Gasbewegung im Winderhitzer. St. u. E. 48 (1928) S. 65.
11. Kretzschmer, Fr.: Betriebliche Erfordernisse wärmewirtschaftlicher Meßgeräte. Mitt. Wärmestelle V. d. Eisenh. Nr. 85/86.
12. Neumann, G., Schack, A., Kühn, P., und Franzen, W.: Versuche an einem neuzeitlichen Winderhitzer auf der Charlottenhütte in Niederschelden. Mitt. Wärmestelle V. d. Eisenh. Nr. 82.
13. Neumann, G.: Erfahrungen und Richtlinien auf dem Gebiete des Gaserzeugerbetriebes. Mitt. Wärmestelle V. d. Eisenh. Nr. 101.
14. Neumann, G.: Wärmetechnische Untersuchungen an einem Siemens-Martin-Ofen. Ber. Stahlwerksaussch. V. d. Eisenh. Nr. 127.
15. Osann, B.: Lehrbuch der Eisenhüttenkunde. 2. Aufl. (Leipzig: W. Engelmann 1923.)
16. Rietschel-Brabbée: Heiz- und Lüftungstechnik. 6. Aufl. (Berlin: Julius Springer 1922.)
17. Roitzheim, R.: Die Bewegung der Gase in hüttenmännischen Oefen. St. u. E. 32 (1912) S. 969.
18. Schack, A.: Geräte und Verfahren zu Temperaturmessungen. Mitt. Wärmestelle V. d. Eisenh. Nr. 96/97.
19. Schack, A.: Zur Kritik der Aehnlichkeitstheorie des Wärmeübergangs. Mitt. Wärmestelle V. d. Eisenh. Nr. 98.
20. Schiller, L.: Experimentelle Untersuchungen zum Turbulenzproblem. Z. angew. Math. Mech. 1 (1921) S. 436.
21. Schleicher, S.: Die Strömungsverhältnisse in den Kammern eines Siemens-Martin-Ofens. Ber. Stahlwerksaussch. V. d. Eisenh. Nr. 123.
22. Schrödter, Rolf: Ueber den Einfluß des Höhenunterschiedes und der Entfernung zwischen Gaserzeugern und Oefen im Martinbetriebe. Dissertation Aachen 1921; dsgl. Ber. Stahlwerksaussch. V. d. Eisenh. Nr. 65 (1922).
23. Schüle, S.: Technische Thermodynamik. 4. Aufl. (Berlin: Julius Springer 1921.)
24. Schwarz, C.: Die Ausflammverluste an Siemens-Martin-Oefen. Ber. Stahlwerksaussch. V. d. Eisenh. Nr. 114.
25. Tafel, W.: Wärme und Wärmewirtschaft der Kraft- und Feuerungsanlagen in der Industrie. (München: R. Oldenbourg 1924.)
26. Wesemann, Fr.: Die Ermittlung des Druckabfalls durch Reibung in Leitungen für Gase, Druckluft, Dampf und Wasser unter besonderer Berücksichtigung graphischer Verfahren. Mitt. Wärmestelle V. d. Eisenh. Nr. 95.
27. Die Anwendung der Gesetze der Hydraulik auf die Berechnung der Flammöfen. Besprechung einer Arbeit von Grum-Grzimailo. St. u. E. 31 (1911) S. 2000.
28. Die Zugverhältnisse bei Regenerativöfen. Wärme 48 (1925) S. 85.
29. Druckmeßgeräte. Mitt. Wärmestelle V. d. Eisenh. Nr. 38.
30. Grundlagen für das richtige Entwerfen von Ofenanlagen. Besprechung einer Arbeit von Grum-Grzimailo. St. u. E. 33 (1913) S. 860.
31. Hütte, Taschenbuch für Eisenhüttenleute. 2. Aufl. (Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn 1922.)
32. Mechanical Engineering 1927.
33. Papers on mechanical and physical Subjects. Cambridge at the University Press 1901, Bd. 2.
34. Ueber die Verminderung der Zugstärke von Schornsteinen durch den Einbau von Rauchgasvorwärmern, Abhitzekesseln usw. Mitt. Wärmestelle V. d. Eisenh. Nr. 9.
35. Untersuchungen über den Strömungswiderstand der Gase in geraden zylindrischen Rohrleitungen. Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens. Heft 60. (Berlin: Julius Springer 1908.)

Druck von A. Bagel Aktiengesellschaft in Düsseldorf.

Lebenslauf.

Geboren bin ich am 20. Juni 1901 als Sohn des damaligen Oberingenieurs August Heil in Dahlbruch, Kreis Siegen (Westfalen).

An Schulen besuchte ich:

das humanistische Gymnasium zu Hindenburg, O.-S.,
das humanistische Gymnasium zu Barmen (Rhld.) und
das humanistische Gymnasium zu Pleß, O.-S.

Die Schulzeit unterbrach ich von Frühjahr bis Herbst 1919 (Oberprima), um bei der Schwadron des Oberschlesischen Freiwilligen-Korps am Grenzschutz teilzunehmen.

Im Februar 1920 erhielt ich das Reifezeugnis und praktizierte von dieser Zeit an bis zum Herbst des Jahres in den Betrieben der Donnersmarckhütte zu Hindenburg, O.-S.

Mit dem Wintersemester 1920/21 begann ich mein Studium bei der Fakultät für Eisenhüttenkunde an der Technischen Hochschule zu Breslau. Im Sommersemester 1921 unterbrach ich mein Studium und nahm beim Bataillon Guttentag des Oberschlesischen Selbstschutzes an der Bekämpfung des Poleneinfalls teil.

Die Semesterferien während meines Studiums benutzte ich zu praktischer Arbeit auf:

Gutehoffnungshütte, Oberhausen,
Peiner Walzwerk, Peine,
Borsigwerk, O.-S.,
Donnersmarckhütte, Hindenburg, O.-S.

Die Diplom-Hauptprüfung bestand ich im Juni 1926 und war von August 1926 bis Februar 1928 bei der Wärmestelle des Vereins deutscher Eisenhüttenleute mit der Anfertigung der vorliegenden Arbeit beschäftigt.